

30 keV He^{2+} 在不同倾斜角度的聚碳酸酯微孔膜中的传输过程

牛书通 周旺 潘鹏 朱炳辉 宋涵宇 邵剑雄 陈熙萌

Transmission of 30-keV He^{2+} ions through polycarbonate nanocapillaries: Dependence on the incident angle

Niu Shu-Tong Zhou Wang Pan Peng Zhu Bing-Hui Song Han-Yu Shao Jian-Xiong Chen Xi-Meng

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 176102 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172484

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172484>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I17>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[近玻尔速度氙离子激发钒的K壳层X射线](#)

Vanadium K-shell X-ray emission induced by xenon ions at near the Bohr velocity

物理学报.2016, 65(2): 027901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.027901>

[低能氢粒子沿不同角度轰击钨\(001\)表面的反射概率及入射深度分布的分子动力学研究](#)

Molecular dynamics simulation of low-energy hydrogen atoms bombarding tungsten (001) surface at different angles and their depth distribution

物理学报.2013, 62(22): 227901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.227901>

[近玻尔速度 \$\text{Ne}^{2+}\$ 离子穿过碳膜引起的电子发射](#)

Secondary electron emission from carbon Foils by Ne^{2+} near Bohr velocity

物理学报.2013, 62(15): 157901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.157901>

[不同 \$E_p/q\$ 值的离子与氧化铝毛细孔的相互作用](#)

Interactions between ions with different values of E_p/q and alumina capillaries

物理学报.2013, 62(1): 016104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.016104>

30 keV He^{2+} 在不同倾斜角度的聚碳酸酯微孔膜中的传输过程*

牛书通¹⁾ 周旺¹⁾²⁾ 潘鹏¹⁾ 朱炳辉¹⁾ 宋涵宇¹⁾ 邵剑雄^{1)†} 陈熙萌^{1)‡}

1) (兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

2) (中国核工业集团有限公司, 中核龙瑞科技有限公司, 嘉峪关 735100)

(2017年11月20日收到; 2018年4月17日收到修改稿)

本文测量了30 keV的 He^{2+} 入射倾斜角度分别为 -0.5° , -1° , -1.5° 和 -2.5° 的聚碳酸酯纳米微孔膜后, 出射粒子角度分布、电荷态分布以及相对穿透率随时间的演化. 当微孔膜倾斜角度在 -0.5° , -1° 和 -1.5° 时, 出射的 He^{2+} 离子始终保持在入射束流方向, 出射的 He^0 原子出射方向由微孔孔道方向逐渐转移到入射束流方向, 在实验过程中观测到明显的电荷交换, 这一现象与之前发现的导向效应不同, 微孔内部沉积的电荷斑和微孔内表面原子的短程集体散射作用, 克服入射离子的横向动量, 使入射离子在微孔内表面以上以类似镜面掠射的方式出射, 并发生时间演化效应, 主要传输机制为电荷斑辅助的表面以上的类似镜面掠射行为. 而当倾斜角度在 -2.5° 时, 出射的 He^{2+} 离子始终保持在入射束流方向, 出射的 He^0 原子始终保持在微孔孔道方向, 沉积的电荷斑很难克服入射离子的横向动量, 没有时间演化效应, 主要传输机制为微孔内表面以下的多次随机非弹性碰撞过程. 这一物理图像使中能离子入射不同倾斜角度的微孔膜物理认识更加深入和完整.

关键词: 倾斜角度, 微孔膜, 镜面掠射

PACS: 61.85.+p, 79.20.Rf, 81.07.De

DOI: 10.7498/aps.67.20172484

1 引言

随着纳米科技的发展, 固体表面的纳米结构受到了极大关注^[1], 同时利用各种材料制作纳米尺度微孔成为可能. 用快重离子辐照和化学蚀刻方法可以产生纳米到微米尺度的不同形状和材料的微孔^[2-7], 在此基础上, 离子与微孔相互作用的实验也随之展开. Stolterfoht等^[8]在2002年发现了低能离子在微孔膜中的导向效应. 他使用3 keV的 Ne^{7+} 离子以一定倾斜角度入射绝缘纳米微孔膜, 发现出射离子几乎都是沿着孔道轴向方向出射且保持电荷态不变, 实验研究发现微孔内壁形成的自组织电荷斑^[9-12]抑制入射离子与微孔内壁碰撞并使入射离子沿着孔的轴线方向出射. 随后, Vienna

研究组^[13-16]从理论方面详细研究低能离子的导向机制, 电荷斑扩散和漂移模型解释了微孔内壁的自组织电荷斑的形成过程. 同时电子^[17]和负离子^[18,19]在微孔膜中输运过程也得到了研究, 尽管电子和负离子在微孔膜中传输机制与正离子不同, 在实验研究中同样发现了导向效应.

高能区(MeV)离子在微孔中输运过程同样得到研究^[7,20,21], 在实验过程中没有发现入射离子的导向效应, 即电荷的沉积对MeV量级入射离子穿过微孔没有影响. Hasegawa等^[21]利用二体卢瑟福散射模型计算出传输粒子的轨迹和能量分布, 发现大部分入射离子直接进入锥形管内壁表面以下发生多次随机非弹性碰撞过程并沉积到微孔内壁以下, 小部分离子不得不沿锥形管的轴向方向出射.

* 国家自然科学基金(批准号: 11675067)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shaojx@lzu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: chenxm@lzu.edu.cn

MeV 量级的离子在微孔中输运特征主要为微孔表面以下的多次随机非弹性碰撞.

在中间能区, 我们分别测量了我们发现的 20 keV [22] 和 100 keV [23] 质子在入射倾斜角为 1° 的聚碳酸酯 (PC) 微孔膜中的输运过程, 对于 20 keV 质子入射倾斜角为 1° 的 PC 微孔膜时, 出射氢原子由束流方向尖峰和孔轴方向的主峰构成, 并且主峰角度基本保持不变而尖峰逐渐消失, 主要输运机制为微孔内表面以下的多次随机非弹性碰撞和近表面镜像散射两种传输方式逐步向电荷斑约束下的导向效应过渡的过程 [22]; 对于 100 keV 质子入射倾斜角为 1° 的 PC 微孔膜时, 出射粒子的峰位由微孔的轴向方向逐步偏转到入射束流方向, 主要输运机制为微孔内电荷斑辅助的表面以上的镜面散射行为 [23].

以上关于中能离子在微孔中的输运过程的研究只关注倾斜角度为 1° 的输运特性, 缺少微孔膜在不同倾斜角度下输运特性的对比. 当离子入射不同倾斜角度的微孔膜时, 入射离子的横向分量是不同的, 此时入射离子在微孔膜中的传输特性会有哪些不同, 还需要对中能离子在不同倾斜角度的微孔膜输运特性进行研究.

本工作系统测量了 30 keV 的 He^{2+} 离子入射倾斜角度为 -0.5° , -1° , -1.5° 和 -2.5° 的 PC 绝缘微孔膜后出射粒子角分布, 电荷态分布及穿透率随时

间的演化特性. 发现微孔膜处于不同倾斜角度的情况下实验过程中的演化过程是不同的. 当微孔膜的倾斜角度为 -0.5° , -1° 和 -1.5° 时, 出射 He^{2+} 中心角度始终保持在入射束流方向, 出射 He 的中心角由微孔孔道方向逐渐向入射束流方向演化的特性, 并在实验过程中观测到出射粒子电荷态分布和穿透率的时间演化过程. 当倾斜角度为 -2.5° , 出射粒子角分布、出射粒子电荷态分布和穿透率没有发现时间演化效应. 本实验的目标是为了进一步从细节上研究离子与不同倾斜角度的微孔膜相互作用的动力学过程.

2 实验技术

本文实验是在中国科学院近代物理研究所 320 kV 高电荷态离子综合研究平台上开展的, 实验装置如图 1 所示. 由 14.5 GHz 电子回旋共振离子源产生束流强度为 500 pA 的 30 keV He^{2+} 离子经过两片 $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 光栏准直后, 入射束流的发散度小于 0.12° , 轰击位于靶室中央的 PC 微孔膜上. 靶室的真空稳定在 10^{-6} Pa . 在微孔膜前的静电偏转板调节束流相对于膜表面的仰角以确保其在仰角方位上垂直入射. 微孔膜的倾斜角度通过调节精度为 0.1° 的调角器, 使微孔膜绕竖直轴旋转而得到, 图 1 (a) 中给出了微孔膜倾斜角和离子出射角

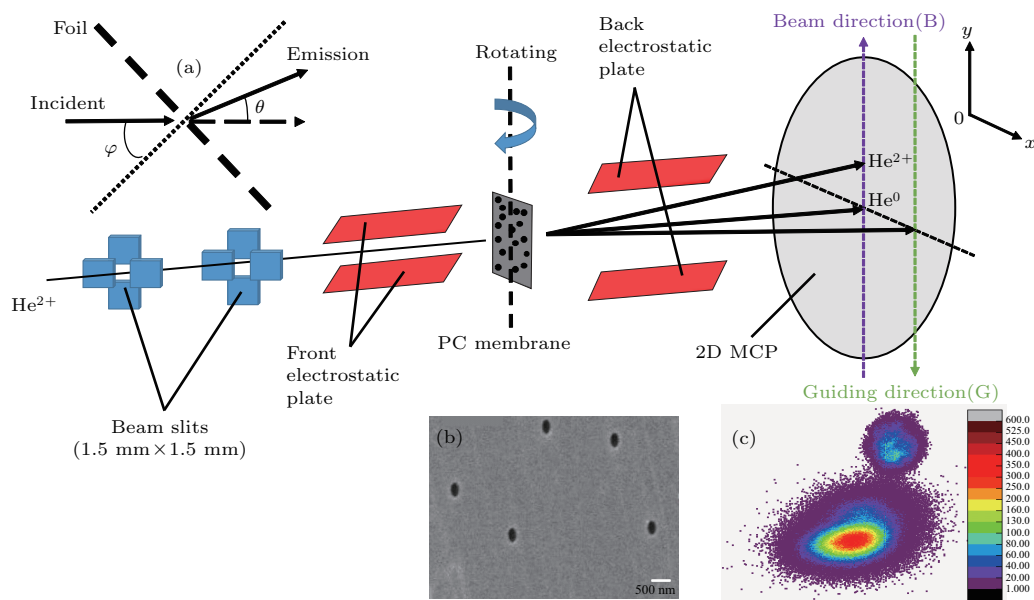


图 1 实验装置示意图 (a) 对于倾斜角和出射角的定义; (b) PC 微孔膜的扫描电子显微成像; (c) 实验所获得的二维谱图
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup: (a) Definitions of the tilt angle φ and the outgoing angle θ ; (b) SEM image of the PC membrane; (c) typical 2D spectrum obtained in the experiment.

的定义, 微孔膜倾斜角是入射离子方向与微孔膜法线的夹角, 出射角为出射粒子方向与入射束流方向的夹角. 出射粒子经由薄膜后的静电偏转板沿着竖直方向进行电荷态分离, 之后被距微孔膜后方 30 cm 处的二维微通道板探测器记录. 图 1(c) 为典型的二维谱图, 上束斑为 He^{2+} , 下束斑为 He^0 , He^{2+} 与 He^0 彼此分离开来, 实验中本底较低. 实验中微孔膜的孔密度为 10^8 cm^{-2} , 厚度为 $30 \mu\text{m}$, 微孔直径为 200 nm (深宽比 150 : 1, 对应的几何张角

为 0.38°), 图 1(b) 为微孔膜的电子显微成像, 微孔呈现圆形并且没有发生重叠现象, 彼此间分离的距离远大于微孔直径 [24].

3 实验结果

在这一部分, 将展示 30 keV 的 He^{2+} 离子入射不同的倾斜角度的 PC 绝缘微孔膜后出射粒子的角分布、电荷态分布以及穿透率的时间演化, 并将会对实验结果给出定性的分析.

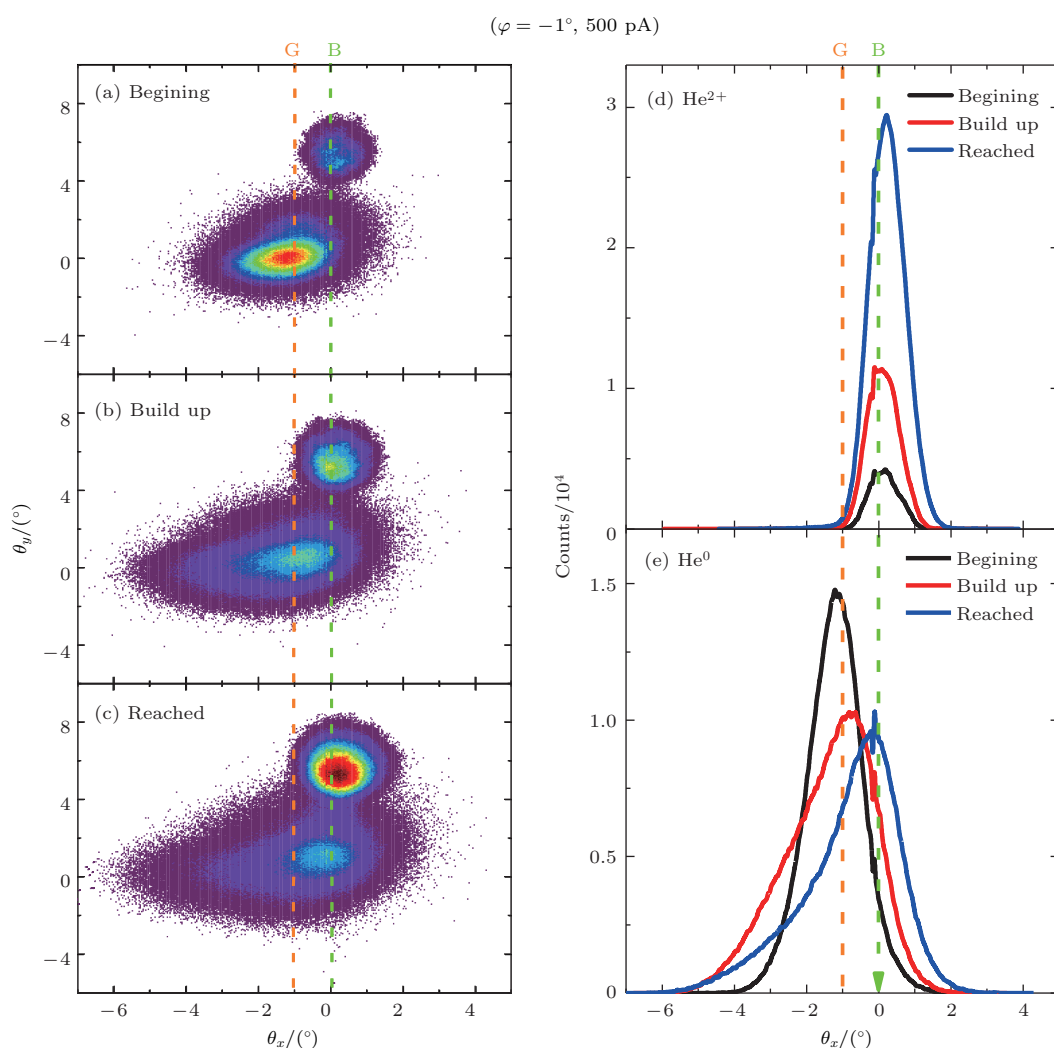


图2 30 keV 的 He^{2+} 入射倾斜角度为 -1° 的 PC 微孔膜得到的二维分布图以及 He^{2+} 和 He^0 在 x 轴方向上的投影 (a), (b), (c) 分别代表实验刚开始阶段、平衡建立阶段以及达到平衡后的二维分布图; (d), (e) 分别为 He^{2+} 束斑和 He^0 束斑在 x 轴方向的投影图, 黑线, 红线和蓝线分别代表图 (a), (b) 和 (c) 的投影数据, 其中绿虚线表示束流方向, 橙虚线表示导向方向

Fig. 2. Typical two-dimensional spectrum and the projections of He^{2+} and He^0 in the x -axis direction of the transmitted particles after 30 keV He^{2+} pass through the PC microporous membrane with a tilt angle of -1° . 2D spectra are recorded at the beginning stage (a), build up stage (b), and reached stage (c). The projections of the 2D spectra of He^{2+} (d) and He^0 (e) along the x -axis direction. The black, red, and blue solid lines represent the projection data in Figs. (a), (b), and (c). The green dash dot lines and orange dash dot lines represent the beam direction and guiding direction, respectively.

以束流强度为500 pA的 He^{2+} 入射倾斜角度为 -1° 的微孔膜为例,图2(a)—(c)分别是在实验开始阶段、平衡建立中以及达到平衡后出射粒子的二维分布图.图2(d)和图2(e)中是图2(a),图2(b)和图2(c)中 He^{2+} 和 He^0 粒子的二维分布图在 x 轴方向上的投影.

在实验开始阶段,见图2(a),出射 He^{2+} 的角度分布在 0° ,即入射束流的方向;出射 He^0 的角度分布在 -1° ,即微孔孔道的方向,并且出射粒子呈现很好的高斯型分布. He^0 的计数明显高于 He^{2+} ,这意味着出射粒子中 He^0 的比例占绝对的主导地位.随着微孔沉积电荷的增加,见图2(b),下束斑 He^0 的计数逐步减少,而上束斑 He^{2+} 的计数在显著增大,出射 He^{2+} 的角度分布仍保持在入射束流的方向,而出射 He^0 的角度分布慢慢偏向入射束流方向.在充放电平衡后,见图2(c),出射 He^{2+} 和 He^0 的角度分布都在入射束流的方向,同时可以看到 He^0 的 x 方向投影有拖尾现象,见图2(e).以上的二维分布图表明:随着充电的进行,孔内壁沉积的电荷斑能够明显抑制30 keV He^{2+} 离子在微孔膜内壁进行了电荷交换,越来越多的 He^{2+} 从入射束流方向出射,而 He^0 粒子则由刚开始的微孔孔道方向逐渐移动至入射束流方向,这一现象与之前发现的导向效应不同.

为了研究这一特性产生的原因,我们进一步测量了30 keV He^{2+} 入射处于不同倾斜角的PC绝缘微孔膜后出射粒子角分布、电荷态分布以及穿透率的时间演化.

图3给出了束流强度在500 pA, He^{2+} 离子

入射处于不同倾斜角度微孔膜时,出射粒子中心角分布随时间的演化.当微孔膜倾斜角为 -0.5° (图3(a)), -1° (图3(b))和 -1.5° (图3(c))时, He^{2+} 的中心角方位不随倾斜角度变化,始终保持在入射束流的方向;对于出射 He^0 原子,在实验刚开始阶段出射方向分别保持在 -0.5° , -1° 和 -1.5° ,即微孔孔道方向.随着微孔内部充电的进行, He^0 原子出射方向逐步偏向入射束流方向.当微孔的倾斜角为 -2.5° (图3(d))时, He^{2+} 的中心角方位保持在入射束流的方向, He^0 的出射中心角始终保持在 -2.9° 附近,即在微孔孔道方向附近,并且在整个测量过程中没有观测明显的偏转变化过程.

图4给出了微孔膜处于不同倾斜角度时,出射粒子电荷态分布随时间的演化.当微孔膜倾斜角为 -0.5° (图4(a)),实验开始时, He^0 占出射粒子的绝大部分,而 He^{2+} 占比很小.随着微孔内部充电的进行, He^0 的比例逐渐减小,而 He^{2+} 逐渐增加,最后出射 He^{2+} 份额维持在60%,即微孔内部形成电荷斑抑制了 He^{2+} 与微孔内部原子之间电荷交换,使越来越多的 He^{2+} 保持原电荷态出射.在微孔膜的倾斜角度分别为 -1° (图4(b))和 -1.5° (图4(c)), He^{2+} 的变化趋势与 -0.5° 的变化趋势基本一致.在充放电平衡以后 He^{2+} 的份额分别为52%和55%.对于倾斜角度为 -2.5° 时(图4(d)), He^0 和 He^{2+} 的电荷态分布变化不明显,分别维持在95%和5%左右.这是由于倾斜角度过大, He^{2+} 入射到微孔膜时大部分转变为 He^0 ,同时

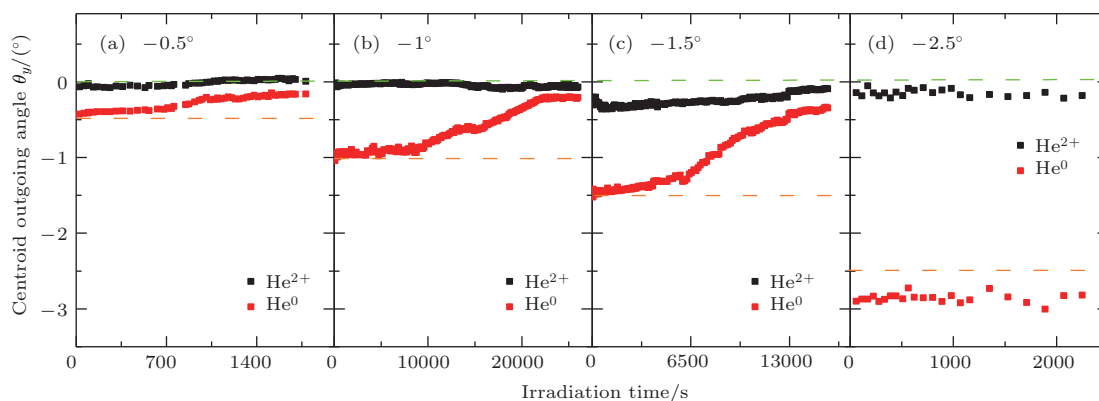


图3 在PC微孔膜的倾斜角度不同的情况下,出射粒子角分布随时间的演化 (a) 倾斜角度为 -0.5° ; (b) 倾斜角度为 -1° ; (c) 倾斜角度为 -1.5° ; (d) 倾斜角度为 -2.5° ; 其中绿虚线表示束流方向,而橙虚线表示导向方向

Fig. 3. Time evolution of the centroid angle of the transmitted particles with different tilt angles of PC microporous membrane: (a) -0.5° tilt angle; (b) -1° tilt angle; (c) -1.5° tilt angle; (d) -2.5° tilt angle. The green dash dot lines and orange dash dot lines represent the beam direction and guiding direction, respectively.

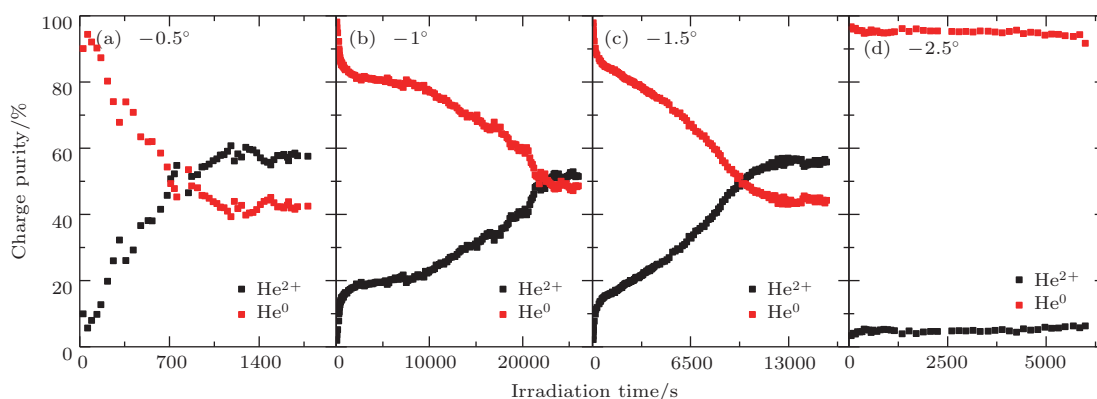


图4 在PC微孔膜的倾斜角度不同的情况下,出射粒子电荷态分布随时间的演化 (a) 倾斜角度为 -0.5° ; (b) 倾斜角度为 -1° ; (c) 倾斜角度为 -1.5° ; (d) 倾斜角度为 -2.5°

Fig. 4. Time evolution of charge purity of the transmitted particles with different tilt angles of PC microporous membrane: (a) -0.5° tilt angle; (b) -1° tilt angle; (c) -1.5° tilt angle; (d) -2.5° tilt angle.

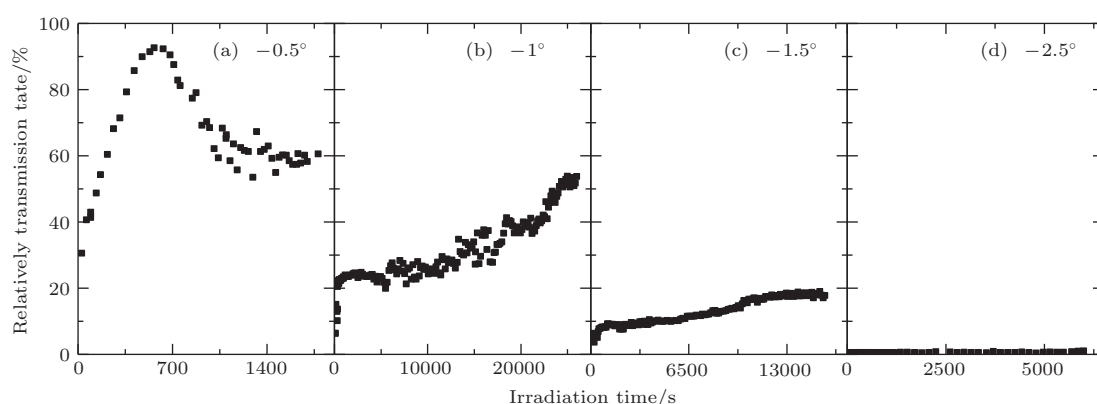


图5 在PC微孔膜的倾斜角度不同的情况下,出射粒子相对穿透率随时间的演化 (a) 倾斜角度为 -0.5° ; (b) 倾斜角度为 -1° ; (c) 倾斜角度为 -1.5° ; (d) 倾斜角度为 -2.5°

Fig. 5. Time evolution of relatively transmission rate of the transmitted particles with different tilt angles of PC microporous membrane: (a) -0.5° tilt angle; (b) -1° tilt angle; (c) -1.5° tilt angle; (d) -2.5° tilt angle.

微孔内部电荷斑不能克服入射离子的横向动量,导致 He^{2+} 不断入射微孔内表面以下,因此实验中未观察到电荷态分布变化。

图5为微孔膜处于不同倾斜角度时出射粒子相对穿透率随时间的演化特性。对于微孔膜的倾斜角度为 -0.5° (图5(a))时,出射粒子的相对穿透率由40%,先快速达到最大值,然后开始减小,这是由于阻塞效应造成的^[25],微孔入口处过强的电荷斑将会适度减弱离子进入微孔的概率,最后稳定在60%。对于 -1° (图5(b))和 -1.5° (图5(c)),粒子相对穿透率都是先快速增加后又缓慢增加的过程,而没有发生阻塞效应,相对穿透率分别稳定在55%和20%。对于 -2.5° (图5(d)),相对穿透率没有发现时间演化,在整个测量过程中一直维持在极低的1%左右。

对于30 keV的 He^{2+} 入射处于不同倾斜角度的PC膜,在小角度的情况下(微孔膜的倾斜角度为

-0.5° , -1° 和 -1.5°),出射 He^{2+} 中心角度始终保持在入射束流方向,出射 He^0 的中心角由微孔孔道方向逐渐向入射束流方向演化的特性,并在实验过程中观测到出射粒子电荷态分布和穿透率的时间演化过程。对于大角度情况下(倾斜角度为 -2.5°),出射粒子角分布、出射粒子电荷态分布和穿透率没有发现时间演化效应。

4 结果讨论

为了更好地理解30 keV He^{2+} 在不同倾斜角度的微孔膜中的运输机制,我们对 He^{2+} 离子在倾斜角度为 -1° 的微孔内传输特性进行定性描述,如图6所示。

对于30 keV的 He^{2+} 离子在倾斜角度为 -1° 的微孔内传输时,入射 He^{2+} 离子的横向分量为9 eV。当实验开始时入射 He^{2+} 直接入射到PC微孔表面

以下, 并与微孔表面以下原子发生随机碰撞, He^{2+} 从微孔内靶原子中获得电子转变为中性化的 He^0 , 微孔内表面沉积正电荷. 大部分中性化的 He^0 经过多次与靶原子的碰撞后沉积在微孔内表面以下; 同时小部分的 He^0 与表面以下的靶原子发生多次的随机二体碰撞, 逐渐忘记其初始的入射轨迹和电荷态, 最终不得不沿着微孔孔道方向出射, 出射 He^0 的分布基本为对称高斯型, 中心方向为微孔孔道方向, 出射 He^0 的半高全宽远大于微孔的几何张角, 如图 6(b) 所示. 只有极少部分的 He^{2+} 离子在微孔表层原子的短程集体散射的作用下以两次类似镜面掠射的方式出射, 出射 He^{2+} 离子占很小一部分, 出射方向为入射束流方向, 如图 6(a) 所示.

随着 He^{2+} 的不断入射, 微孔内沉积电荷斑逐步形成, 在电荷斑的库仑排斥作用下使得 He^{2+} 离子和微孔内表面之间的电荷交换受到抑制, 越来越多的 He^{2+} 离子通过第一个电荷斑的库仑排斥作用并使 He^{2+} 轨迹发生偏转进入微孔后半部分, 同时在微孔后半部分在第二个电荷斑库仑排斥作用和微孔表面原子集体散射作用下以类似镜面掠射方式从入射束流的方向出射, 使 He^{2+} 的电荷态纯度和相对穿透率显著增加, 即在微孔内壁电荷斑平衡后, 出射 He^{2+} 沿入射束流方向出射, 如图 6(c) 所示, 同时一部分 He^{2+} 离子经过一次类似镜面掠射后再次进入微孔内表面发生电荷交换变为 He^0 , 并以类似镜面掠射的方式反射出去, 最终沿着入射束流方向出射; 小部分 He^0 会穿入表面以下完成多次的随机二体碰撞, 从而沿着微孔孔道方向出射, 出射 He^0 分布将表现为沿着入射束流方向出射的大高斯峰和位于微孔孔道方向的小高斯峰的叠加, 即 B 线附近的高斯峰以及 G 线附近的肩膀, 如图 6(d) 所示.

微孔膜的倾斜角为 -0.5° , -1° 和 -1.5° 时, He^{2+} 仍会以类似镜面掠射的形式沿束流方向出射, -0.5° 情况与之前所述 -1° 情况类似, 不同的是在微孔内部形成沉积电荷斑的位置与 -1° 不同, 而对于 -1.5° 入射情况而言, 电荷斑增加为 4 个, 即入射离子经过 4 次类似镜面掠射后沿束流方向出射. 通过计算当微孔膜的倾斜角度在 -0.5° , -1° 和 -1.5° , 30 keV 的 He^{2+} 的横向分量分别为 2.3, 9 eV 和 20 eV. 随着微孔膜倾斜角度的增加, 在微孔内部需要沉积更多的电荷才能克服入射离子的横向动量, 使出射离子最终的电荷态分布和相对穿透率随入射角度增加而减小. 当微孔膜倾斜角度在 -0.5° ,

-1° 和 -1.5° 时, 主要传输机制为电荷斑辅助的表面以上的类似镜面掠射行为.

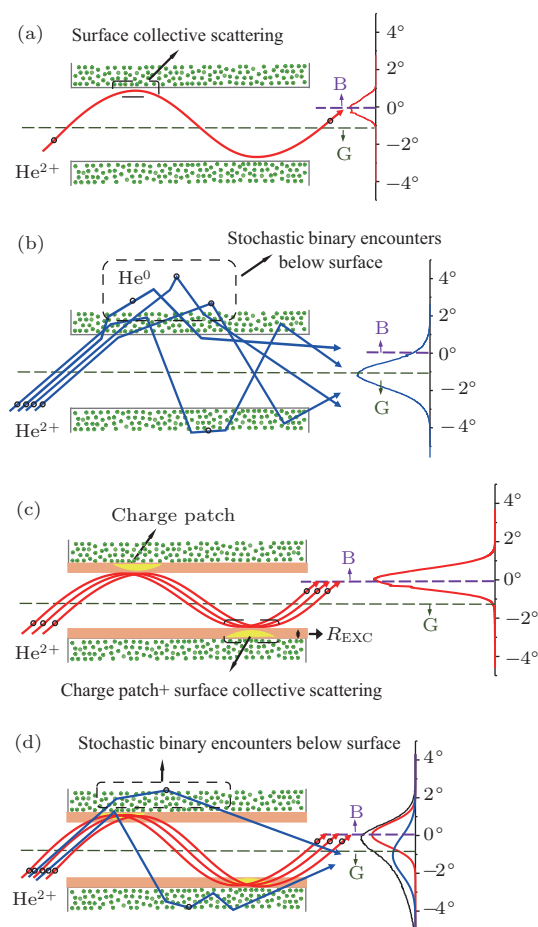


图 6 离子在微孔中传输过程示意图 其中图 (a) 和 (c) 分别为实验刚开始和到达平衡后 He^{2+} 离子的传输轨迹, (b) 和 (d) 分别为实验刚开始和到达平衡后 He^0 的传输轨迹, 右侧对应每种情景的出射粒子在 x 方向投影谱图, 倾斜角度为 -1°

Fig. 6. Schematic diagram of ions transmission process in the nanocapillaries. Transmission trajectories of He^{2+} in the initial experimental stage (a) and balanced stage (c). Transmission trajectories of He^0 in the initial experimental stage (b) and balanced stage (d). Projections of the transmitted particles in the x -axis direction for these 4 scenarios are shown on the right with -1° tilt angle.

而当微孔膜倾斜角增加到 -2.5° 时, 30 keV 的 He^{2+} 的横向分量为 57 eV. 入射 He^{2+} 在孔道内形成的电荷斑数量都会增加, 可能前几块电荷斑还能够“托起” He^{2+} 使其接近表面发生类似镜面掠射, 但之后碰撞形成的电荷斑不能克服这么大的横向动量, 几乎所有的 He^{2+} 都会进入表面以下, 中性化后的 He^0 经过无规则的随机碰撞沿孔道轴向方向出射, 只有极少部分的 He^{2+} 能够在表面经过数次的类似镜面掠射行为, 基本沿入射束流方向出射,

不能观测到明显的时间演化过程. 当微孔膜倾斜角度在 -2.5° 时, 主要传输机制为表面以下的多次随机非弹性碰撞过程.

5 结 论

测量了 30 keV 的 He^{2+} 离子入射处于不同倾斜角的 PC 绝缘微孔膜后出射粒子特性的时间演化, 发现无论微孔膜的倾斜角如何变化, 出射的 He^{2+} 都是在电荷斑辅助下经过近表面类似镜面掠射并沿束流方向出射; 在微孔膜倾斜角为 -0.5° , -1° 和 -1.5° , 随着微孔内部的电荷斑的形成, He^0 的出射中心角方位会呈现由微孔孔轴方向转向入射束流方向的特性, 此外还观测到了显著的电荷交换现象. 在倾斜角度为 -2.5° 时, He^0 的出射方位始终保持在孔道方向, 没有时间的演化效应. 即在小角度 (-0.5° , -1° 和 -1.5°) 时, 微孔内部沉积的电荷斑的库仑排斥作用和微孔内表面原子的短程集体散射力作用克服入射离子的横向动量, 使入射离子在微孔近表面经过数次类似镜面掠射后出射, 并发生时间演化效应, 主要传输机制为电荷斑辅助的表面以上的类似镜面掠射行为; 在大角度 (-2.5°), 沉积的电荷斑很难克服入射离子的横向动量, 没有时间演化效应, 主要传输机制为表面以下的多次随机非弹性碰撞过程. 对于几十 keV 的低电荷态离子在微孔中的轨迹主要受到表层原子集体散射作用, 而电荷斑的贡献为通过抑制电荷交换从而增加表面掠射概率, 在两种效应共同作用下使得 He^{2+} 得以保持入射方向和电荷态出射, 该过程受到入射角度的影响.

感谢中国科学院近代物理研究所 320 kV 高电荷态离子物理实验平台上的员工为我们提供高品质稳定的离子束.

参考文献

- [1] El-said A, Heller R, Meissl W, Ritter R, Facsko S, Lemell C, Solleder B, Gebeshuber I, Betz G, Toulemonde M, Möller W, Burgdörfer J, Aumayr F 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 237601
- [2] Kottmann J, Martin O, Smith D, Schultz S 2001 *Phys. Rev. B* **64** 235402
- [3] Kumar R, Badel X, Vikor G, Linnros J, Schuch R 2005 *Nanotechnology* **16** 1697
- [4] Mátéfi-Tempfli S, Mátéfi-Tempfli M, Piraux L, Juhász Z, Biri S, Fekete É, Iván I, Gáll F, Sulik B, Vikor G, Pálincás J, Stolterfoht N 2006 *Nanotechnology* **17** 3915
- [5] Mo D, Liu J, Duan J L, Yao H J, Chen Y H, Sun Y M, Zhai P F 2012 *Mat. Lett.* **68** 201
- [6] Fleischer R L, Price P B, Walker R M 1969 *Sci. Amer.* **220** 30
- [7] Lemell C, Burgdörfer J, Aumayr F 2013 *Prog. Surf. Sci.* **88** 237
- [8] Stolterfoht N, Bremer J H, Hoffmann V, Hellhammer R, Fink D, Petrov A, Sulik B 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 133201
- [9] Skog P, Zhang H Q, Schuch R 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 223202
- [10] Stolterfoht N, Hellhammer R, Bundesmann J, Fink D, Kanai Y, Hoshino M, Kambara T, Ikeda T, Yamazaki Y 2007 *Phys. Rev. A* **76** 022712
- [11] Stolterfoht N, Hellhammer R, Fink D, Sulik B, Juhász Z, Bodewits E, Dang H M, Hoekstra R 2009 *Phys. Rev. A* **79** 022901
- [12] Kanai Y, Hoshino M, Kambara T, Ikeda T, Hellhammer R, Stolterfoht N, Yamazaki Y 2009 *Phys. Rev. A* **79** 012711
- [13] Schiessl K, Palfinger W, Lemell C, Burgdörfer J 2005 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **232** 228
- [14] Schiessl K, Palfinger W, Tökési K, Nowotny H, Lemell C, Burgdörfer J 2005 *Phys. Rev. A* **72** 062902
- [15] Schiessl K, Palfinger W, Tökési K, Nowotny H, Lemell C, Burgdörfer J 2007 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **258** 150
- [16] Lemell C, Schiessl K, Nowotny H, Burgdörfer J 2007 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **256** 66
- [17] Schiessl K, Tökési K, Solleder B, Lemell C, Burgdörfer J 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 163201
- [18] Sun G Z, Chen X M, Wang J, Chen Y F, Xu J K, Zhou C L, Shao J X, Cui Y, Ding B W, Yin Y Z, Wang X A, Lou F J, Lv X Y, Qiu X Y, Jia J J, Chen L, Xi F Y, Chen Z C, Li L T, Liu Z Y 2009 *Phys. Rev. A* **79** 052902
- [19] Feng D, Shao J X, Zhao L, Ji M C, Zou X R, Wang G Y, Ma Y L, Zhou W, Zhou H, Li Y, Zhou M, Chen X M 2012 *Phys. Rev. A* **85** 064901
- [20] Simon M J, Zhou C L, Döbeli M, Cassimi A, Monnet I, Méry A, Grygiel C, Guillois S, Madi T, Benyagoub A, Lebius H, Müller A M, Shiromaru H, Synal H A 2014 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **330** 11
- [21] Hasegawa J, Jaiyen S, Polee C, Chankow N, Oguri Y 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 044913
- [22] Bai X F, Niu S T, Zhou W, Wang G Y, Pan P, Fang X, Chen X M, Shao J X 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 093401 (in Chinese) [白雄飞, 牛书通, 周旺, 王光义, 潘鹏, 方兴, 陈熙萌, 邵剑雄 2017 物理学报 **66** 093401]
- [23] Zhou W, Niu S T, Yan X W, Bai X F, Han C Z, Zhang M X, Zhou L H, Yang A X, Pan P, Shao J X, Chen X M 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 103401 (in Chinese) [周旺, 牛书通, 闫学文, 白雄飞, 韩承志, 张鹏泉, 周利华, 杨爱香, 潘鹏, 邵剑雄, 陈熙萌 2016 物理学报 **65** 103401]
- [24] Mo D 2009 *Ph. D. Dissertation* (Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [莫丹 2009 博士学位论文 (兰州: 中国科学院近代物理研究所)]
- [25] Stolterfoht N, Hellhammer R, Sulik B, Juhász Z, Bayer V, Trautmann C, Bodewits E, Hoekstra R 2011 *Phys. Rev. A* **83** 062901

Transmission of 30-keV He^{2+} ions through polycarbonate nanocapillaries: Dependence on the incident angle*

Niu Shu-Tong¹⁾ Zhou Wang¹⁾²⁾ Pan Peng¹⁾ Zhu Bing-Hui¹⁾ Song Han-Yu¹⁾
Shao Jian-Xiong^{1)†} Chen Xi-Meng^{1)‡}

1) (School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

2) (The Longrui Technology Company Limited, China National Nuclear Corporation, Jiayuguan 735100, China)

(Received 20 November 2017; revised manuscript received 17 April 2018)

Abstract

Nanocapillaries in various materials have received considerable attention due to the rapid growth of the nanotechnology. Recent studies have focused on the transmission of ions through the nanocapillary.

The pioneer work, the transmission of 3-keV Ne^{7+} through polyethylene terephthalate nanocapillaries based on guiding effect has been reported by Stolterfoht et al. (2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 133201), indicating that the self-organized charge patches on the capillary walls, which inhibits close contact between the ions and the inner capillary walls, deflecting the trajectories of ions, and thus the ions transmit along the direction of the capillary axis. For the high-energy region ($E/Q > 1$ MV), Hasegawa et al. (2011 *J. Appl. Phys.* **110** 044913) measured the outgoing angle and energy distribution of 2 MeV H^+ ions transmitted through a tapered glass capillary. The results indicated that the main transport mechanism of the MeV ions in a tapered glass capillary is the multiple random inelastic collisions below the surface.

In the medium-energy region (E/Q from dozens of keV to hundreds of keV), Zhou et al. (2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 103401) measured the transmission features of the 100-keV protons transmitted through a polycarbonate (PC) membrane at a tilt angle of $+1^\circ$, the transmitted particles were located around the direction along the incident beam, not along the capillary axis, the transport mechanism of the 100-keV protons in the nanocapillary is the charge-patch-assisted collective scatterings on the surface. With the nanocapillary membranes at different tilt angles, the transverse momentum of the incident ions are different. What is the transmission mechanism of the ions in nanocapillary membranes at different tilt angles? In the present study, we measure the time evolution of the angular distribution, charge state distribution and relatively transmission rate of 30-keV He^{2+} ions with 500 pA transmitting through a polycarbonate nanocapillary membrane at different incident angles (-0.5° , -1° , -1.5° , -2.5°). It is found that for the small tilt angles (-0.5° , -1° , -1.5°) the transmitted He^{2+} ions are located around the direction of incident beam, not along the capillary axis, and the directions of the transmitted H^0 atoms change from the direction of capillary axis to the direction of incident beam gradually, during the experimental period, the charge exchange is observed. The charge patches in the capillaries overcome the transverse momentum of the incident ions, the ions are transmitted by specular scatterings on the inner surface of capillary, and the main transport mechanism of ions in the nanocapillary at the small tilt angles is the charge-patch-assisted collective scatterings on the surface. For a large tilt angle (-2.5°), the transmitted He^{2+} ions are located in the direction of the incident beam, and He^0 atoms are always in the direction of capillary axis, the charge patches cannot overcome the transverse momentum of the incident ions, and the main transport mechanism of ions in the nanocapillary at the large tilt angles is the multiple random inelastic collisions below the surface. This finding increases the knowledge of charged ions through nanocapillary at different tilt angles within dozens of keV energies in many scientific fields.

Keywords: incident angle, nanocapillary membrane, specular scatterings

PACS: 61.85.+p, 79.20.Rf, 81.07.De

DOI: 10.7498/aps.67.20172484

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11675067).

† Corresponding author. E-mail: shaojx@lzu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: chenxm@lzu.edu.cn